

Reforço ao Corte de Vigas T de Betão Armado por Inserção de Laminados de CFRP

Shear Strengthening of T RC Beams with Near Surface Mounted CFRP Laminates

Salvador Dias (1); Joaquim Barros (2)

(1) *Assistente, Departamento de Engenharia Civil
Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Portugal
email: sdias@civil.uminho.pt*

(2) *Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil
Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Portugal
email: barros@civil.uminho.pt*

*Escola de Engenharia da Universidade do Minho
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães Portugal*

Resumo

A eficácia da técnica de reforço de elementos de betão armado baseada na inserção de laminados de fibras de carbono (CFRP) em finos entalhes efectuados no betão de recobrimento, designada na literatura internacional por *Near Surface Mounted (NSM)*, tem sido testada no reforço ao corte de vigas de betão armado. Neste trabalho é apresentada uma série de ensaios experimentais realizados com vigas T de betão armado reforçadas ao corte por intermédio da NSM. A influência de parâmetros como a percentagem de estribos de aço, a percentagem de CFRP e a inclinação dos laminados foi avaliada em termos de capacidade de carga da viga, de capacidade deformacional na rotura e dos modos de ruína. Os resultados obtidos nesta série de ensaios são analisados e interpretados.

Palavras-Chave: Reforço ao corte, CFRP, laminados inseridos e betão

Abstract

The effectiveness of a strengthening technique based on fixing, by epoxy adhesive, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) laminate strips into pre-cut slits opened in the concrete cover of the lateral surfaces of the beams, designated *Near Surface Mounted (NSM)*, has been assessed for the shear strengthening of concrete beams. In the present work, a series of tests with T cross section reinforced concrete beams, shear strengthened by NSM technique, is presented. The influence of the percentage of steel stirrups, and the percentage and orientation of CFRP laminates on the beam load carrying capacity, deformability and failure mode was evaluated. The results obtained in this test series are presented and analyzed.

Keywords: Shear strengthening, CFRP, Near Surface Mounted and concrete

1 Introdução

Tradicionalmente existem duas técnicas de reforço ao corte de vigas de betão armado, uma que recorre à utilização de armaduras exteriores; e a outra em que as secções são encamisadas com betão armado. Em relação à primeira, a fixação das armaduras exteriores (chapas de aço ou perfis metálicos) é geralmente efectuada com adesivos epoxídicos, os quais podem ser aplicados por espalhamento sobre as superfícies a fixar, ou por injeção preenchendo os espaços entre a superfície da peça a reforçar e o elemento de reforço. A ligação pode ser complementada com buchas metálicas. De forma a garantir boas condições de ligação do reforço é necessário proceder a uma cuidadosa preparação, não somente da superfície de betão a reforçar, como também das chapas. Trata-se de uma técnica cujos procedimentos são bem conhecidos pela comunidade técnica que trabalha na área do reforço estrutural, e que envolve materiais de comportamento extensivamente estudado. No entanto, apresenta alguns inconvenientes, nomeadamente: devido à corrosividade do aço há grande probabilidade da zona da colagem (interface betão-adesivo-aço) se deteriorar; dificuldade de manipulação de pesadas chapas de aço no local da obra (especialmente em superfícies curvas); necessidade de suportes provisórios durante o tempo de cura do adesivo; limitação do comprimento das chapas, por restrições do seu transporte, podendo dar origem à necessidade de execução de emendas. A técnica de encamisamento com betão armado consiste no aumento da secção transversal introduzindo-se uma armadura suplementar numa camada de betão que envolve a secção inicial. Em comparação com a técnica que recorre à aplicação de armaduras exteriores, a técnica de encamisamento com betão garante maior protecção ao fogo e à corrosão das armaduras suplementares. No entanto, o aumento das dimensões da secção transversal nem sempre é admissível do ponto de vista arquitectónico e pode causar restrições à manutenção do tipo de utilização da construção. Além disto, é necessário um determinado tempo até que o betão de encamisamento ganhe resistência e a estrutura possa ser posta em serviço.

A utilização de compósitos de CFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono) no reforço estrutural está associada ao facto de se pretender evitar os aspectos negativos apontados anteriormente às técnicas de reforço tradicionais. Os CFRP apresentam elevada rigidez e resistência à tracção, baixo peso específico e bom comportamento à fadiga. O reduzido peso específico dos CFRP facilita o seu transporte e manuseamento. A disponibilização destes materiais com dimensões quase ilimitadas em termos de comprimento, ao contrário do que acontece com as chapas de aço, elimina a necessidade de executar emendas no reforço. A elevada resistência à corrosão dos CFRP permite a sua utilização em ambientes agressivos como, por exemplo, em zonas costeiras. As elevadas potencialidades dos materiais compósitos em termos mecânicos proporcionam soluções de reforço que poucas alterações introduzem na arquitectura inicial das estruturas, conseguindo-se obter consideráveis aumentos da capacidade resistente dos elementos estruturais com recurso a pequenas quantidades de reforço. Além disto, existem compósitos de CFRP que se adaptam perfeitamente a superfícies curvas, o que é difícil e oneroso de se conseguir por meio de chapas metálicas. A par disto, as técnicas de reforço utilizando materiais compósitos são de fácil e rápida execução.

A colagem externa de compósitos de CFRP com as fibras orientadas transversalmente ao eixo da peça ou segundo a normal às potenciais fendas de corte permite aumentar a capacidade resistente ao esforço transversal do elemento (KHALIFA (1999)). Diversos estudos experimentais, alguns deles descritos por DIAS et al. (2004-a) e por BOUSSELHAM et al. (2004), têm demonstrado que a colagem externa de CFRP (mantas e laminados) permite aumentar consideravelmente a resistência ao corte de vigas de betão armado. No entanto, em resultado do descolamento prematuro do CFRP, o nível máximo de tensão mobilizado no reforço é bastante inferior à sua resistência última. Além disto, estes modos de rotura são frágeis e quase instantâneos. Por estes motivos, pela

susceptibilidade dos CFRP colados externamente à acção do fogo, às condições ambientais adversas e a actos de vandalismo, novas técnicas de reforço ao corte com CFRP têm vindo a ser propostas pela comunidade científica.

Com o objectivo de aumentar a eficácia dos CFRP no reforço ao corte, DE LORENZIS (2002) utilizou varões de CFRP inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais de vigas de betão armado. Esta técnica de reforço permitiu aumentar significativamente a capacidade de carga das vigas. Além disto, esta técnica garante uma maior protecção do reforço, pois este encontra-se inserido no elemento e não colado externamente. Um dos aspectos menos positivos desta técnica é a necessidade de efectuar no betão de recobrimento entalhes com dimensões suficientes para alojar o varão mais a espessura do adesivo. DIAS et al. (2004-b) propuseram uma técnica de reforço ao corte para vigas de betão armado baseada em procedimentos de reforço semelhantes aos utilizados por DE LORENZIS (2002) mas, em vez de varões de CFRP, são utilizadas faixas de laminado de CFRP inseridas em finos entalhes. Trata-se assim da aplicação, no reforço ao corte, da técnica já experimentada no reforço à flexão de elementos de betão armado. Os estudos efectuados (BLASCHKO et al. (1999); EL-HACHA et al. (2004); BARROS et al. (2005)) permitiram verificar tratar-se de uma técnica mais eficaz e mais simples de executar que as baseadas na colagem externa de CFRP. Ensaaios de arranque em flexão revelaram que os valores médios das tensões de corte alcançados na ligação betão-CFRP são significativamente superiores aos registados com técnicas baseadas na colagem exterior (SENA-CRUZ (2004)).

2 Programa de ensaios preliminares

De forma a validar a técnica de reforço ao corte de vigas de betão armado por inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento (NSM), foi realizado um programa experimental preliminar em que o comportamento de vigas reforçadas ao corte com CFRP por intermédio da técnica NSM foi comparado com o de vigas reforçadas ao corte com CFRP por intermédio da técnica da colagem externa (DIAS et al. (2004-b)). O programa experimental englobou vigas sem qualquer armadura transversal, vigas com estribos de aço verticais, vigas em que o reforço ao corte foi materializado por intermédio de faixas discretas de manta de CFRP coladas externamente em forma de U, e vigas reforçadas ao esforço transversal com laminados de CFRP dispostos verticalmente ou inclinados a 45°, inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais da viga. As vigas tinham secção transversal rectangular e as que foram reforçadas com CFRP não continham armaduras transversais de aço. A quantidade de reforço nos vários sistemas utilizados (estribos de aço, mantas e laminados de CFRP) foi determinada por forma a que o modo de ruína das vigas fosse por corte e para valores de carga semelhantes.

Os resultados destes ensaios permitiram concluir que a utilização de compósitos de CFRP como elementos resistentes ao esforço transversal, colados externamente (mantas) ou inseridos no betão de recobrimento (laminados), permite aumentos significativos da capacidade máxima de carga de vigas de betão armado com rotura por corte. Comparando as duas técnicas de reforço com CFRP, a NSM foi mais eficaz em termos de capacidade máxima resistente, capacidade deformacional e carga residual pós-pico. As vigas reforçadas com laminados apresentaram carga máxima e capacidade deformacional semelhantes às registadas nas vigas estribadas. Também se verificou que os modos de rotura das vigas reforçadas ao corte com laminados inseridos são menos frágeis que os verificados nas vigas reforçadas com faixas de manta coladas externamente. Quando comparada com a técnica que recorre à colagem externa de manta de CFRP, a que se baseia na inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento é mais fácil e rápida de executar, pelo que mais económica. Além disto, este sistema de reforço fica mais protegido das condições ambientais agressivas e de actos de vandalismo.

Os resultados obtidos no programa de ensaios preliminares motivaram a realização de um ambicioso programa experimental com vigas T (geometria que melhor simula o cenário real de uma intervenção de reforço), no qual se pretende avaliar a influência que os seguintes parâmetros têm no desempenho da NSM no reforço ao corte de vigas de betão armado: classe de resistência do betão; relação entre o comprimento do vão de corte e a altura útil da secção; percentagem de CFRP; orientação dos CFRP; percentagem da armadura transversal (estribos de aço). Nas próximas secções será apresentado a primeira série de vigas T ensaiadas no âmbito do referido programa experimental.

3 Programa experimental

3.1 Modelos ensaiados

O programa experimental apresentado neste trabalho envolveu a concepção de dezasseis modelos de vigas de betão armado de secção transversal em T (Figura 1).



Figura 1 – Vigas ensaiadas

As vigas de betão armado ensaiadas tinham uma secção transversal em T com 0.40 m de altura. A alma tinha uma largura de 0.18 m e uma altura de 0.30 m, enquanto o banzo tinha 0.10 m de altura e 0.45 m de largura. O comprimento total das vigas era de 2.45 m com um vão livre de 2.25 m. De forma a localizar a zona de rotura das vigas, os ensaios foram efectuados sob três pontos de carga, com vãos de corte diferentes, conforme representado na Figura 2. A relação entre o maior vão de corte (b) e o menor vão de corte (a) é de 1.5. As vigas tinham um vão de corte (a) igual a duas vezes e meia a altura útil da secção ($a/d = 2.5$). Longitudinalmente, as vigas continham $3\phi 25$ na face traccionada. Em todas as vigas utilizou-se a mesma armadura no banzo: $6\phi 12$ longitudinais e estribos de 6 mm de diâmetro afastados de 150 mm (ver Figura 2).

De forma a evitar que a rotura por corte ocorresse no maior vão de corte (b) foram colocados, em todas as vigas no referido vão de corte, estribos de 6 mm de diâmetro afastados de 75 mm. As alterações entre modelos ficaram circunscritas ao menor vão de corte (a). O programa experimental englobou quatro tipos de vigas, diferenciadas pela forma como foi garantida a resistência ao esforço transversal no menor dos vãos de corte (a). Assim, além de uma viga sem qualquer reforço ao corte, foram ensaiadas vigas com várias percentagens de estribos de aço, com ou sem reforço ao corte com laminados de CFRP, e vigas reforçadas ao corte unicamente com laminados de CFRP.

O pré-dimensionamento dos modelos ensaiados foi efectuado de forma a tentar garantir a rotura por corte e, para o caso dos modelos reforçados com CFRP (com ou sem estribos de aço), que tivessem uma capacidade de carga semelhante à viga de betão armado com a maior percentagem de estribos de aço considerada (Tabela 1). O modo de rotura por flexão registado no ensaio da viga de referência REF-S (ver Tabela 1) permitiu concluir que o objectivo de garantir a rotura por corte não seria atingido num número considerável de vigas. Deste modo, foi necessário proceder ao reforço à flexão, na zona de momentos flectores mais elevados, tendo-se optado pela técnica da inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento da face traccionada das vigas. As vigas com reforço à flexão continham quatro laminados de CFRP (Figura 2). O ensaio da viga 7SRFLI foi

interrompido prematuramente, dado ter ocorrido o destacamento do betão de recobrimento no apoio mais solicitado. Para evitar a ocorrência deste modo de rotura, nas vigas subsequentes (com a excepção das vigas REF-7S e REF-5S) este canto foi reforçado localmente com manta de CFRP, ficando as fibras dispostas segundo a direcção do eixo da viga (ver Figura 2). Nas Figuras 2 e 3 e na Tabela 1 apresentam-se os dados necessários para a caracterização das vigas ensaiadas.

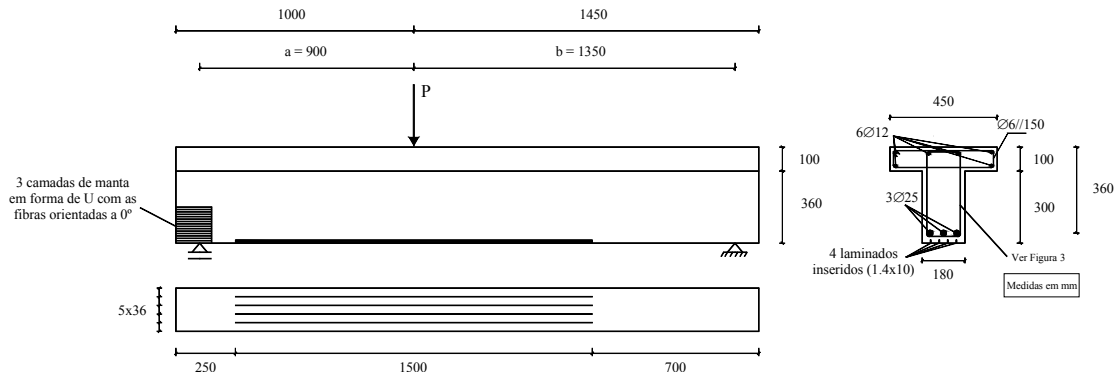


Figura 2 – Vigas ensaiadas: geometria, armaduras comuns a todas as vigas, reforço à flexão com laminados de CFRP e reforço do canto inferior esquerdo com manta de CFRP

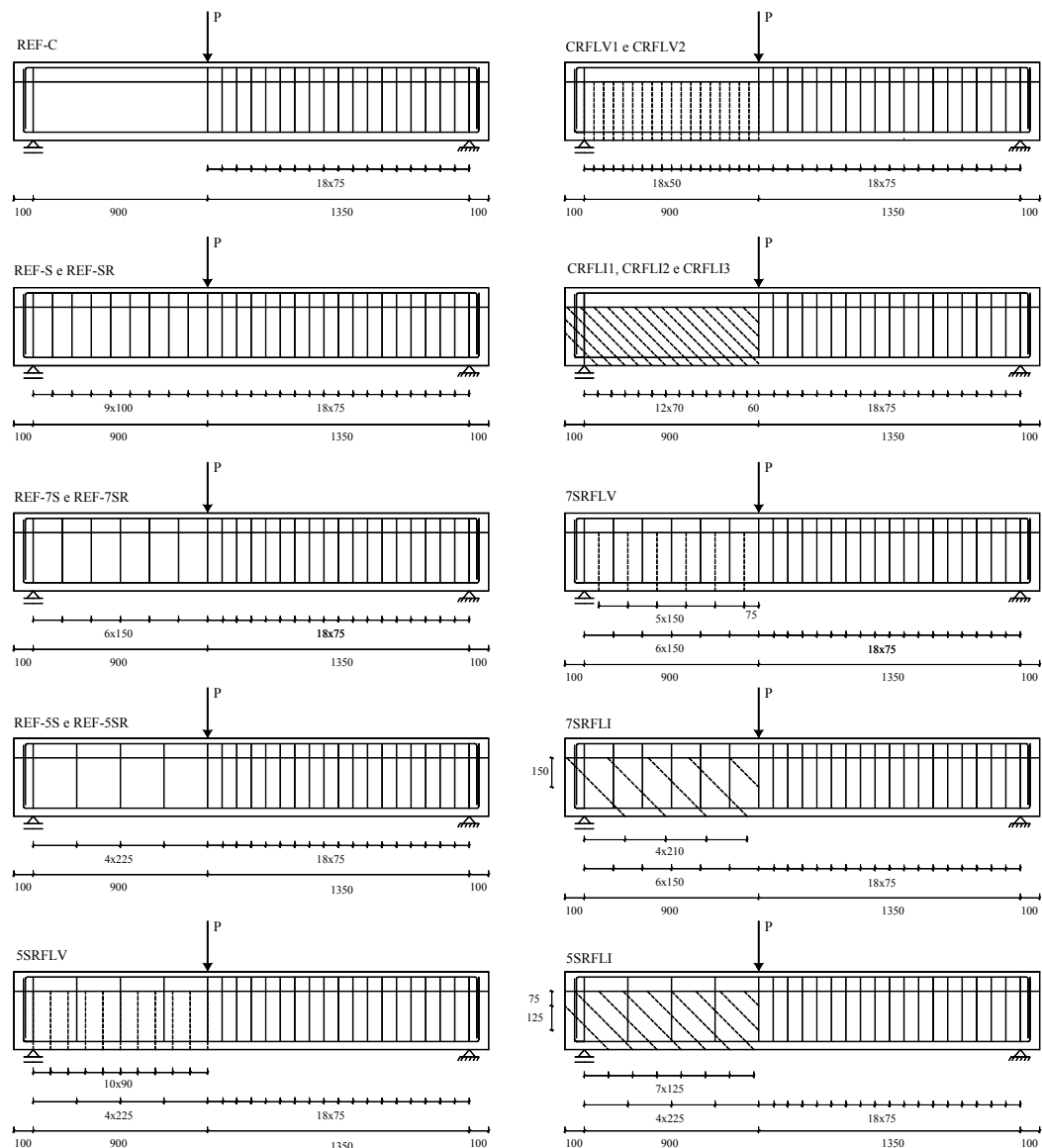


Figura 3 – Vigas ensaiadas: localização das armaduras transversais (linha a traço cheio) e dos laminados de CFRP no reforço ao corte (linha a tracejado)

Tabela 1 – Descrição dos modelos de vigas ensaiados.

Vigas	Idade à data do ensaio (dias)	Reforço à flexão	Sistema de reforço ao corte no menor vão de corte (a)			
			Material	Quantidade	Espaçamento (mm)	Ângulo (°)
REF-C	206	Não	-	-	-	-
REF-S	203	Não	Estribos de aço (100%) *	10 ϕ 6 (2 ramos)	100	90
REF-7S	241	Não	Estribos de aço (70%) **	7 ϕ 6 (2 ramos)	150	90
REF-5S	242	Não	Estribos de aço (50%) ***	5 ϕ 6 (2 ramos)	225	90
REF-SR	266	Sim	Estribos de aço (100%)	10 ϕ 6 (2 ramos)	100	90
REF-7SR	265	Sim	Estribos de aço (70%)	7 ϕ 6 (2 ramos)	150	90
REF-5SR	265	Sim	Estribos de aço (50%)	5 ϕ 6 (2 ramos)	225	90
CRFLV1	224	Sim	Laminados de CFRP	19 laminados (1.4x10 mm ²)	50	90
CRFLV2	237	Sim	Laminados de CFRP	19 laminados (1.4x10 mm ²)	50	90
CRFLI1	220	Sim	Laminados de CFRP	16 laminados (1.4x10 mm ²)	70	45
CRFLI2	238	Sim	Laminados de CFRP	16 laminados (1.4x10 mm ²)	70	45
CRFLI3	273	Sim	Laminados de CFRP	16 laminados (1.4x10 mm ²)	70	45
7SRFLV	229	Sim	Estribos de aço (70%)	7 ϕ 6 (2 ramos)	150	90
			Laminados de CFRP	6 laminados (1.4x10 mm ²)	150	90
7SRFLI	208	Sim	Estribos de aço (70%)	7 ϕ 6 (2 ramos)	150	90
			Laminados de CFRP	5 laminados (1.4x10 mm ²)	210	45
5SRFLV	223	Sim	Estribos de aço (50%)	5 ϕ 6 (2 ramos)	225	90
			Laminados de CFRP	11 laminados (1.4x10 mm ²)	90	90
5SRFLI	217	Sim	Estribos de aço (50%)	5 ϕ 6 (2 ramos)	225	90
			Laminados de CFRP	9 laminados (1.4x10 mm ²)	125	45

* (100%) - Viga com a quantidade máxima de estribos considerada; ** (70%) - Viga com 70% da quantidade máxima de estribos considerada;

*** (50%) - Viga com 50% da quantidade máxima de estribos considerada.

3.2 Propriedades dos materiais

A avaliação da resistência à compressão do betão das vigas foi efectuada experimentalmente aos 28 dias e à data da realização dos ensaios das vigas, a qual corresponde uma idade média de 234 dias. Para tal, efectuaram-se ensaios de compressão directa sobre cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Nas vigas ensaiadas utilizaram-se armaduras de três tipos de varões de aço nervurado (varões com diâmetro de 6 mm, 12 mm e 25 mm), cujas principais propriedades foram avaliadas experimentalmente por intermédio de ensaios de tracção uniaxial. A caracterização dos laminados de CFRP utilizados (S&P Laminates CFK 150/2000, S&P (2002)) foi também efectuada por ensaios de tracção uniaxial. Na Tabela 2 estão registados os valores médios, obtidos experimentalmente, das propriedades mecânicas mais significativas do betão, dos aços e dos laminados de CFRP utilizados. O adesivo utilizado para a fixação dos laminados (MBrace Resin 220 (DEGUSSA (2003))) é caracterizado por ter um tempo de trabalhabilidade de 60 minutos, do endurecimento total registar-se ao fim de 3 dias da sua aplicação e que esta deve ser feita com temperaturas entre os 10°C e os 30°C (temperaturas do suporte e do material). A manta de CFRP utilizada no reforço do canto inferior das vigas tem a designação comercial S&P C-Sheet 240 - 300 gr/m² (S&P (2002)).

Tabela 2 – Propriedades dos materiais (valores médios experimentais).

Betão	28 dias de idade		Data do ensaio das vigas	
	$f_{cm} = 35.2$ MPa		$f_{cm} = 47.9$ MPa (234 dias)	
Aço	Tensão	$\phi 6$	$\phi 12$	$\phi 25$
	f_{sym} *	567 MPa	465 MPa	422 MPa
	f_{sum} **	686 MPa	575 MPa	575 MPa
Laminados de CFRP	Resistência à tracção	Módulo de elasticidade	Extensão máxima ***	Espessura
	$f_{fum} = 2952$ MPa **	$E_{fm} = 166.6$ GPa	$\epsilon_{fum} = 17.7$ ‰	1.4 mm

* Valor médio da tensão de cedência; ** Valor médio da tensão máxima; *** Obtido pela lei de Hooke.

3.3 Reforço das vigas

As faixas de laminado de CFRP, com secção transversal de $1.4 \times 10 \text{ mm}^2$, foram inseridas em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais da alma das vigas. Os entalhes, com cerca de 5 mm de largura e 15 mm de profundidade, foram executados com um equipamento que dispõe de um disco de corte e dispositivos de ajuste da profundidade e do alinhamento do entalhe. Nas vigas com estribos de aço o betão de recobrimento destes tinha espessura de 20 mm. Verificou-se que nenhum estribo ficou danificado. Após a abertura dos entalhes procedeu-se à sua limpeza por intermédio de jactos de ar. Os laminados foram cortados com o comprimento desejado e posteriormente foram limpos com um desengordurante. A fixação dos laminados foi efectuada por intermédio de um adesivo epoxídico. Primeiro, o entalhe foi preenchido com adesivo e, depois, o laminado, também com adesivo aplicado nas superfícies laterais, foi inserido no entalhe. A operação de reforço termina com a remoção do adesivo em excesso e a execução do acabamento final. As tarefas descritas encontram-se ilustradas na Figura 4. Os procedimentos anteriormente referidos também foram executados no reforço à flexão com laminados de CFRP. Em relação ao reforço com mantas de CFRP, após a preparação da superfície com um esmeril, incluindo o arredondamento das arestas, e a aplicação de uma camada de primário (MBrace Resin 50, DEGUSSA (2003)) procedeu-se à colagem das mantas com uma resina epoxídica (MBrace Resin 55, DEGUSSA (2003)).

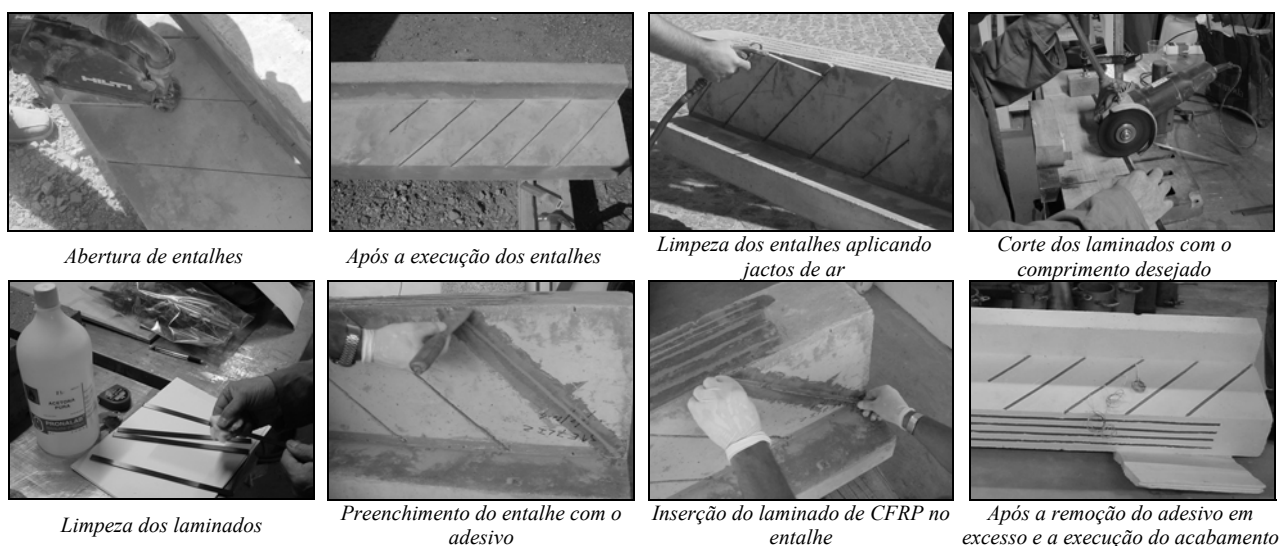


Figura 4 – Etapas da execução do reforço ao corte com laminados de CFRP segundo a técnica NSM

3.4 Sistema de ensaio

As vigas foram submetidas a três pontos de carga até à sua rotura. Na Figura 5 apresenta-se o esquema geral de ensaio das vigas. Os ensaios foram controlados por intermédio do LVDT colocado na secção de aplicação da carga, tendo-se utilizado uma velocidade de deslocamento de 0.01 mm/s.

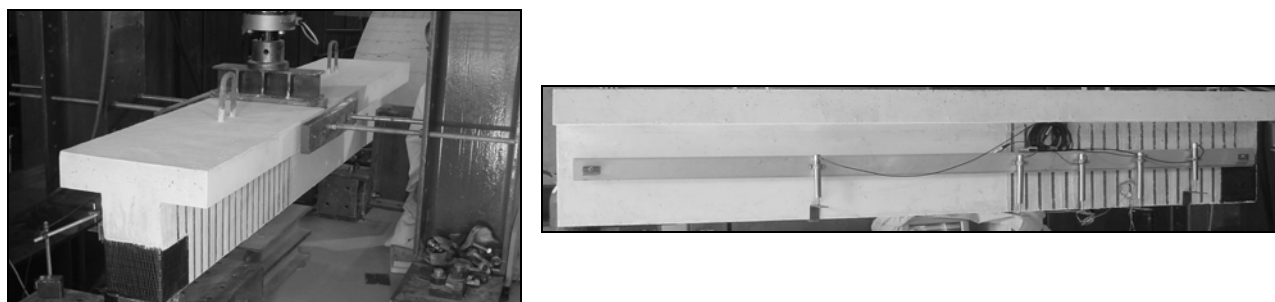


Figura 5 – Esquema de ensaio das vigas

3.5 Apresentação dos resultados

A Tabela 3 apresenta, para cada modelo ensaiado, os principais resultados em termos de estados limites (serviço e último), assim como os modos de rotura observados. A carga de serviço, $F_{l/400}$, corresponde à que se verificou para uma flecha de $L/400$ na secção de aplicação da carga, em que L é o vão livre da viga ($L/400=5.625$ mm). Os maiores valores de $F_{l/400}$ registaram-se nos modelos reforçados ao corte apenas com laminados inclinados a 45° . Para este tipo de configuração de reforço ao corte com CFRP, os valores de $F_{l/400}$ decresceram com a diminuição da percentagem de CFRP. Quanto às vigas reforçadas ao corte só com laminados verticais, $F_{l/400}$, tal como foi definida, não pode ser obtida uma vez que a carga máxima se verificou para uma flecha inferior a $L/400$ (o mesmo aconteceu na viga REF-C). Os valores de $F_{l/400}$ foram semelhantes nas vigas 7SRFLV e 5SRFLV.

Tendo por comparação a carga de rotura registada na viga de referência REF-C, os valores da Tabela 3 indicam que a presença dos laminados de CFRP no reforço ao corte, independentemente da percentagem e orientação do reforço de CFRP e da presença ou não de estribos de aço, proporcionou um aumento significativo da capacidade de carga das vigas. De um modo geral, o reforço ao corte com os CFRP introduzidos em entalhes inclinados foi mais eficaz que o reforço com os CFRP dispostos na vertical. Os valores mais elevados, de capacidade de carga máxima e da respectiva flecha na secção de aplicação da carga, das vigas reforçadas ao corte com CFRP foram registados nas vigas com alguma percentagem de estribos. Assim, das vigas reforçadas ao corte com CFRP, as que tiveram menor desempenho foram as que não continham qualquer armadura transversal. À excepção dos modelos REF-S, 7SRFLV, 7SRFLI e 5SRFLI, as restantes vigas romperam por corte. O modo de rotura “Corte (cedência da armadura)” indicado na Tabela 3 significa que após a cedência das armaduras longitudinais, a viga acabou por romper devido à formação de uma fenda de rotura de corte. Nos pontos seguintes serão pormenorizados os modos de rotura ocorridos. Confrontando os valores da carga máxima das vigas REF-S, 7SRFLV e 5SRFLI verifica-se que o reforço à flexão com CFRP aplicado a elementos estruturais com uma elevada percentagem de armadura longitudinal permitiu um aumento de carga máxima de pelo menos 12%.

Tabela 3 – Principais resultados de cada um dos modelos ensaiados.

Vigas	Reforço de CFRP à flexão	Reforço ao corte	$F_{l/400}$ (kN)	F_{max} (kN)	δ_{max}^{**} (mm)	Modo de rotura
REF-C	Não	-	*	177.6	3.14	Corte
REF-S	Não	Estribos de aço (100%)	341.7	451.7	40.74	Flexão
REF-7S	Não	Estribos de aço (70%)	349.9	429.6	8.33	Corte
REF-5S	Não	Estribos de aço (50%)	359.4	432.1	7.81	Corte
REF-SR	Sim	Estribos de aço (100%)	386.7	488.1	13.39	Corte (cedência da armadura)
REF-7SR	Sim	Estribos de aço (70%)	338.6	392.7	8.42	Corte
REF-5SR	Sim	Estribos de aço (50%)	373.6	404.2	8.92	Corte
CRFLV1	Sim	Laminados de CFRP	*	338.3	4.81	Corte
CRFLV2	Sim	Laminados de CFRP	*	345.9	5.22	Corte
CRFLI1	Sim	Laminados de CFRP	416.9	423.2	5.88	Corte
CRFLI2	Sim	Laminados de CFRP	410.0	416.4	5.88	Corte
CRFLI3	Sim	Laminados de CFRP	427.7	436.7	5.83	Corte
7SRFLV	Sim	Estribos de aço (70%) + Laminados de CFRP	386.0	503.9	18.57	Flexão
7SRFLI	Sim	Estribos de aço (70%) + Laminados de CFRP	386.2	>475.7***	>10.80	Destacamento de betão no canto inferior esquerdo da viga
5SRFLV	Sim	Estribos de aço (50%) + Laminados de CFRP	380.3	437.9	7.30	Corte
5SRFLI	Sim	Estribos de aço (50%) + Laminados de CFRP	406.1	>504.5***	>14.98	Esta viga não atingiu a rotura por limitação do equipamento

* A flecha correspondente a $L/400=5.625$ mm só foi atingida após F_{max} ; ** Deslocamento na secção de aplicação da carga referente a F_{max} ;

*** Vigas que não atingiram a sua capacidade máxima de carga.

4 Análise dos resultados

4.1 Vigas reforçadas ao corte com CFRP sem estribos de aço

Na Figura 6 apresentam-se as curvas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga referentes às vigas REF-C, REF-SR, CRFLV2 (representativa da solução de reforço ao corte com laminados verticais) e CRFLI2 (representativa da solução de reforço ao corte com laminados inclinados a 45°). Da análise da Figura 6 e dos valores da Tabela 3 verifica-se que a presença dos laminados de CFRP, verticais ou inclinados a 45°, proporcionou um aumento significativo da capacidade de carga da viga de referência sem qualquer reforço ao corte (REF-C). Os laminados verticais garantiram um aumento médio de 93% da carga máxima, enquanto que os laminados inclinados proporcionaram um aumento médio de 140%. Os valores médios da carga máxima das vigas reforçadas com laminados verticais e inclinados correspondem a 70% e 87%, respectivamente, da carga máxima registada na viga com a maior percentagem de estribos de aço (REF-SR). O valor médio da flecha na secção de aplicação da carga, aquando da rotura das vigas reforçadas ao corte com CFRP, foi cerca de 40% do registado na viga REF-SR. A carga de serviço das vigas reforçadas ao corte com laminados aplicados a 45° foi mais elevada do que a registada na viga REF-SR. O mesmo não aconteceu com as vigas reforçadas com laminados verticais, dado que a flecha correspondente à sua carga máxima foi inferior à flecha considerada de serviço ($L/400 = 5.625$ mm). Todas estas constatações permitem verificar que a colocação dos laminados em entalhes inclinados a 45° é mais eficaz do que a sua colocação em entalhes verticais.

Na Figura 7 apresentam-se imagens da sequência do ensaio de uma viga reforçada ao corte apenas com laminados de CFRP inseridos em entalhes inclinados a 45°, onde é possível verificar que, após o aparecimento de uma série de fendas ao longo da alma da viga, surge a determinado momento uma fenda horizontal na zona de ligação alma/banzo. Esta fenda inicia-se quando a fenda de corte, que atravessa o núcleo interno da alma da viga, alcança o seu banzo, progredindo na horizontal antes de inflectir para o banzo, na direcção do ponto de carga. Com o aumento da abertura e deslizamento das faces da fenda de rotura por corte, o betão de recobrimento das faces laterais da viga, que se encontram reforçadas com os laminados, forma uma “parede reforçada” que vai-se destacando do núcleo da alma da viga. A carga máxima é atingida com a formação completa de fenda de rotura por corte (desde o ponto de aplicação da carga até à secção próxima da interrupção do reforço à flexão com CFRP).

Devido ao destacamento da camada de betão de recobrimento das faces laterais da viga, não foi possível mobilizar toda a capacidade de reforço dos laminados, justificando os menores valores de carga máxima e flecha na rotura destas vigas, quando comparados com os registados na viga REF-SR (viga com a maior percentagem de estribos de aço). A Figura 7 também contém pormenores dos modos de ruína verificados nas vigas reforçadas ao corte unicamente com laminados de CFRP.

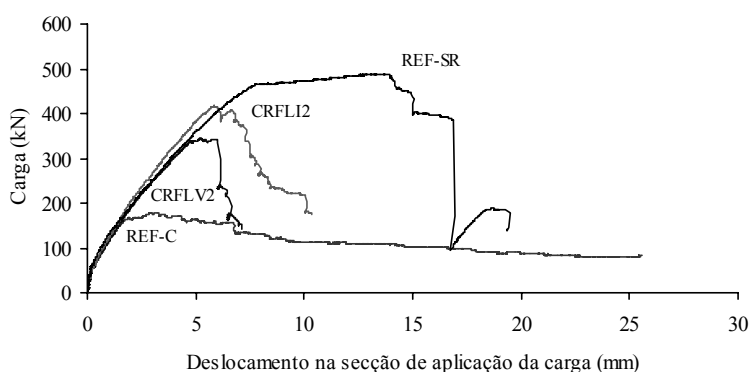
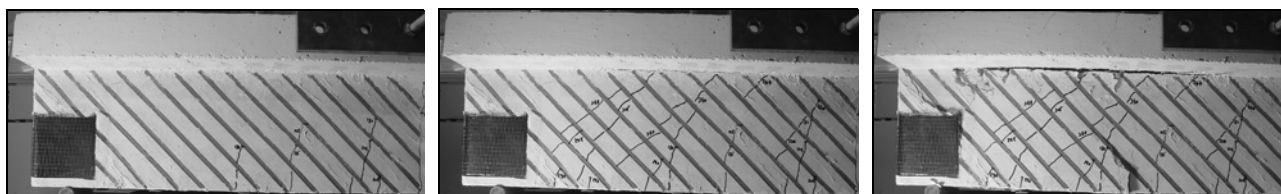
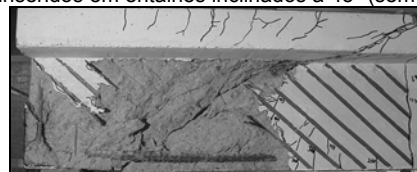
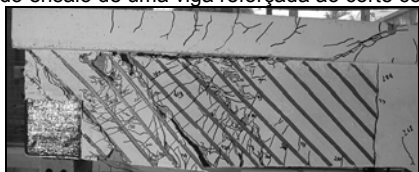


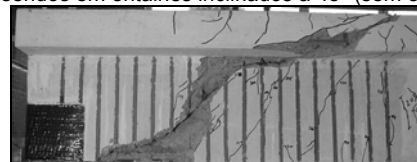
Figura 6 – Curvas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas REF-C, CRFLV2, CRFLI2 e REF-SR



Fases do ensaio de uma viga reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes inclinados a 45° (sem estribos)



Modo de rotura das vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes inclinados a 45° (sem estribos)



Modo de rotura das vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes verticais (sem estribos)

Figura 7 – Fases do ensaio de uma viga reforçada ao corte com laminados inclinados a 45° (sem estribos) e modos de rotura das vigas reforçadas ao corte com CFRP (sem estribos)

Na Figura 8 apresenta-se o aspecto final das vigas em análise após a realização dos ensaios, sendo possível observar os modos de rotura e o padrão de fendilhação final instalado. Este foi menos extenso na viga REF-C e bastante mais repartido na viga REF-SR. Entre estes dois níveis de fendilhação estão os das vigas reforçadas com CFRP, sendo o verificado na viga com laminados inclinados mais extenso que o verificado na viga com laminados verticais. Outro aspecto que se pode constatar da análise da Figura 8 é que, para a viga REF-C (sem reforço à flexão com CFRP) a fenda de corte de rotura prolonga-se até ao apoio, enquanto na viga REF-SR (com reforço à flexão com CFRP) a referida fenda termina junto à secção de interrupção do reforço à flexão. Na viga reforçada à flexão com CFRP, as tensões de corte adicionais, transferidas pelas extremidades dos laminados longitudinais para o betão envolvente, alteraram o caminho das tensões principais de tracção, levando a fenda de rotura a terminar junto às extremidades dos laminados do reforço à flexão.

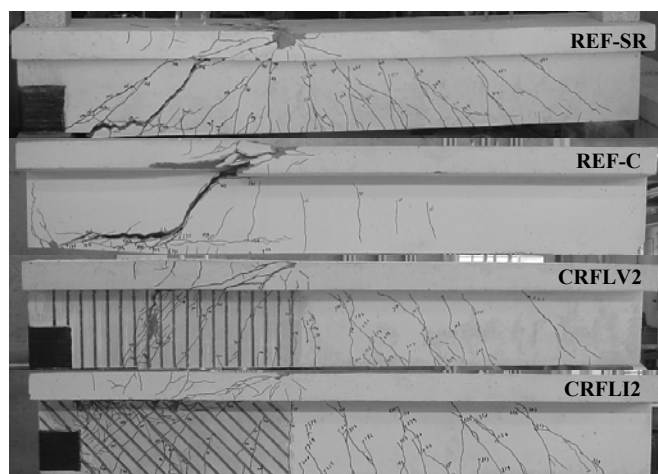


Figura 8 – Vigas REF-SR, REF-C, CRFLV2 e CRFLI2 posteriormente aos ensaios

4.2 Vigas reforçadas ao corte com CFRP e com estribos de aço

Na Figura 9 apresentam-se as curvas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga referentes às vigas de referência (REF-C e REF-SR) e às vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos na vertical. Verifica-se que, relativamente à viga de referência REF-C, e independentemente da presença ou não de estribos de aço, as vigas

reforçadas com laminados na vertical obtiveram um desempenho bastante superior. Comparando a força máxima registada nas vigas reforçadas com laminados de CFRP verticais com a observada na viga REF-C verifica-se que nas vigas 5SRFLV, 7SRFLV e CRFLV (valor médio das duas vigas reforçadas ao corte unicamente com CFRP verticais) alcançou-se um valor 147%, 184% e 93% superior, respectivamente (ver Tabela 3). A viga 7SRFLV além de ser a viga com maior carga máxima registada, foi a que teve maior flecha na secção de aplicação da carga, sendo a única das três soluções de reforço com laminados verticais que superou o desempenho da viga REF-SR (viga com a maior percentagem de estribos de aço). Comparando a força máxima registada nas vigas reforçadas com laminados de CFRP verticais com a observada na viga REF-SR verifica-se que nas vigas 5SRFLV, 7SRFLV e CRFLV (valor médio das duas vigas reforçadas ao corte unicamente com CFRP verticais) alcançou-se um valor de 90%, 103% e 70%, respectivamente. Ao contrário das restantes vigas reforçadas com CFRP em entalhes verticais, para as quais o modo de rotura foi por corte, o modo de ruína da viga 7SRFLV foi por flexão.

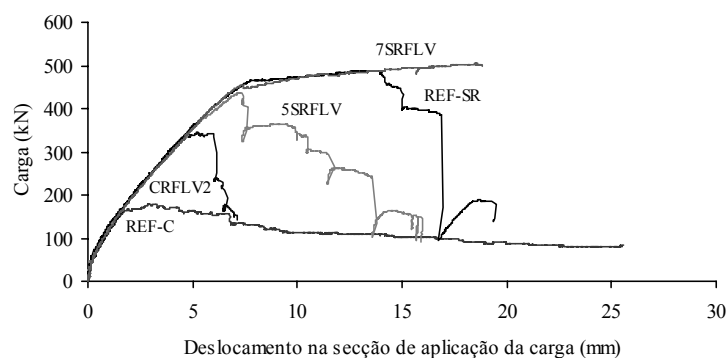


Figura 9 – Curvas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas REF-C, CRFLV2, 5SRFLV, 7SRFLV e REF-SR

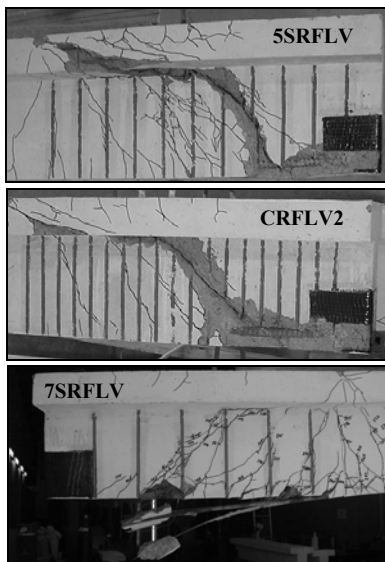


Figura 10 – Pormenores dos modos de ruína das vigas 5SRFLV, CRFLV2 e 7SRFLV



Figura 11 – Vigas CRFLV2, 5SRFLV e 7SRFLV posteriormente aos ensaios

O desempenho da viga 5SRFLV foi condicionado pelo modo de ruína verificado. Tal como se pode observar na Figura 10, a fenda de rotura de corte apresenta uma inclinação muito elevada, o que diminui o “caminho” que a fenda teve de percorrer para originar a rotura da viga, pelo que foi atravessada por um menor número de laminados. Além disso, a superfície da fenda de rotura de corte é atravessada por estribos posicionados nas extremidades da fenda (ver Figura 3), pelo que são de reduzida efectividade em termos de impedir a rotura por corte. Os modos de rotura das vigas REF-C, REF-SR e CRFLV2

foram anteriormente relatados. Na Figura 11 apresenta-se o aspecto final das vigas CRFLV2, 5SRFLV e 7SRFLV após a realização dos ensaios, sendo possível observar os modos de rotura e o padrão de fendilhação final instalado. O padrão de fendilhação foi tão mais difuso quanto maior foi a capacidade de carga das vigas (mais distribuído na viga 7SRFLV e menos distribuído na viga CRFLV2).

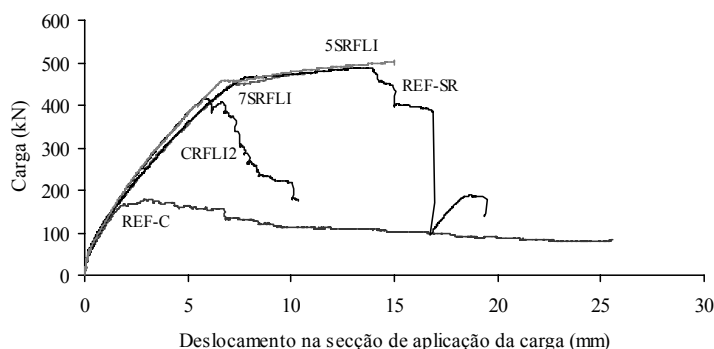


Figura 12 – Curvas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas REF-C, CRFLI2, 5SRFLI, 7SRFLI e REF-SR

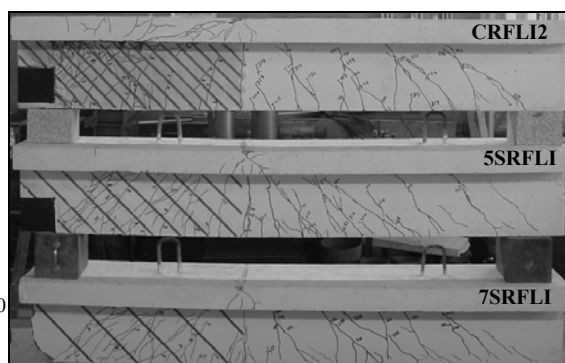


Figura 13 – Vigas CRFLI2, 5SRFLI e 7SRFLI posteriormente aos ensaios

Na Figura 12 apresentam-se as curvas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga referentes às vigas de referência (REF-C e REF-SR) e às vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes inclinados a 45°. Verifica-se que, relativamente à viga de referência REF-C, e independentemente da presença ou não de estribos de aço, as vigas reforçadas com laminados inclinados obtiveram um desempenho bastante superior. Comparando a força máxima registada nas vigas reforçadas com laminados de CFRP inseridos em entalhes inclinados a 45° com a observada na viga REF-C verifica-se que nas vigas 5SRFLI, 7SRFLI e CRFLI (valor médio das três vigas reforçadas ao corte unicamente com CFRP inclinados a 45°) alcançou-se um valor 184% (no mínimo), 168% (no mínimo) e 140% superior, respectivamente (ver Tabela 3). A expressão “no mínimo” traduz o facto de no ensaio da viga em causa não ter sido alcançada a sua carga máxima, pelo que o valor indicado é inferior ao que seria obtido caso tivesse sido possível levar a viga até à sua capacidade máxima de carga.

De entre as vigas reforçadas com laminados inclinados, a viga 5SRFLI, além de ter sido aquela em que se registou a maior capacidade de carga, foi também a que teve maior flecha na secção de aplicação da carga correspondente à carga máxima, sendo a única das três soluções de reforço com laminados inclinados que superou o desempenho da viga REF-SR (viga com a maior percentagem de estribos de aço). Comparando a força máxima registada nas vigas reforçadas com laminados de CFRP inclinados a 45° com a observada na viga REF-SR verifica-se que nas vigas 5SRFLI, 7SRFLI e CRFLI (valor médio das três vigas reforçadas ao corte unicamente com CFRP inclinados a 45°) alcançou-se um valor de 103% (no mínimo), 97% (no mínimo) e 87%, respectivamente.

Nestes resultados deve ser realçado em primeiro lugar o facto de a viga 5SRFLI não ter atingido a rotura por limitação da capacidade de carga do equipamento de ensaio e, em segundo lugar, o facto do ensaio da viga 7SRFLI ter sido interrompido devido à rotura localizada do suporte mais solicitado da viga (destacamento do betão de recobrimento – ver Figura 13). Notar, no entanto, que no momento em que ocorreu esta rotura localizada, a armadura longitudinal já tinha entrado em cedência (ver Figura 12). O padrão de fendilhação e a abertura das fendas no final do ensaio indicavam que, se não tivesse ocorrido a rotura do apoio, a capacidade de carga da viga teria ultrapassado os 500 kN. Nas vigas 5SRFLI e 7SRFLI, tal como para a viga REF-SR, as armaduras longitudinais entraram em cedência o que não aconteceu para o caso das vigas reforçadas ao corte unicamente com laminados de CFRP. Na Figura 13 apresenta-se o aspecto final das vigas CRFLI2, 5SRFLI e 7SRFLI após a realização dos ensaios.

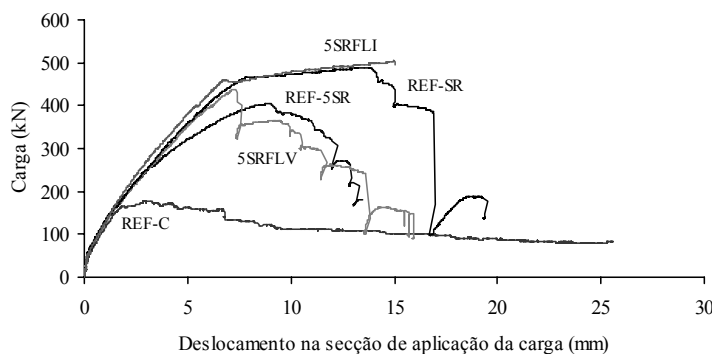


Figura 14 – Curvas carga vs deslocamento na seção de aplicação da carga das vigas REF-C, REF-5SR, 5SRFLV, 5SRFLI e REF-SR

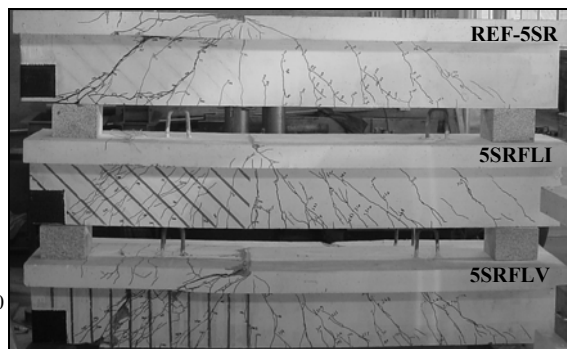


Figura 15 – Vigas REF-5SR, 5SRFLI e 5SRFLV posteriormente aos ensaios

Na Figura 14 apresentam-se as curvas carga vs deslocamento na seção de aplicação da carga referentes às vigas de referência (REF-C, REF-5SR e REF-SR) e às vigas 5SRFLV e 5SRFLI (vigas iguais à viga REF-5SR reforçadas ao corte com laminados de CFRP). Verifica-se que, relativamente à viga de referência REF-5SR, as vigas em análise reforçadas ao corte com CFRP obtiveram melhor desempenho. Considerando a força máxima registada na viga REF-5SR verifica-se que a viga 5SRFLV (laminados verticais) obteve um valor 8% superior enquanto a viga 5SRFLI (laminados inclinados a 45°) teve um valor 25% superior (no mínimo). Em termos de flecha na rotura, a viga 5SRFLI teve melhor desempenho que a viga REF-5SR, o que não se verificou com a viga 5SRFLV. O reforço com laminados inclinados a 45° proporcionou a cedência das armaduras longitudinais o que não se verificou na viga com CFRP na vertical. O modo de rotura da viga REF-5SR foi por corte, tal como o que se verificou na viga 5SRFLV. Na Figura 15 apresenta-se o aspecto final das vigas REF-5SR, 5SRFLI e 5SRFLV após a realização dos ensaios, onde é possível verificar que as vigas reforçadas ao corte com CFRP têm um padrão final de fendilhação mais extenso que o verificado na viga REF-5SR.

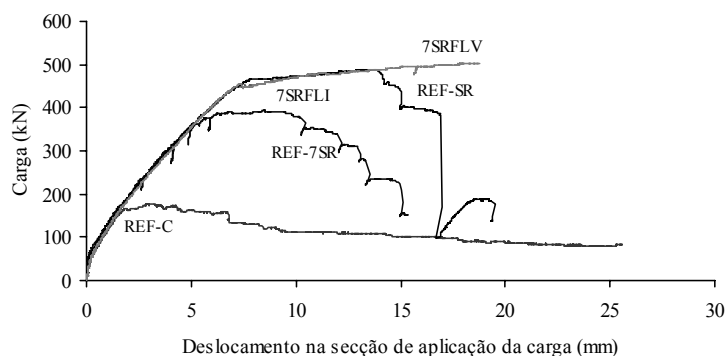


Figura 16 – Curvas carga vs deslocamento na seção de aplicação da carga das vigas REF-C, REF-7SR, 7SRFLV, 7SRFLI e REF-SR

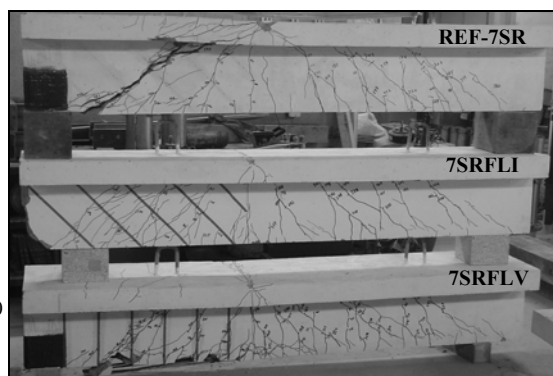


Figura 17 – Vigas REF-7SR, 7SRFLI e 7SRFLV posteriormente aos ensaios

Na Figura 16 apresentam-se as curvas carga vs deslocamento na seção de aplicação da carga referentes às vigas de referência (REF-C, REF-7SR e REF-SR) e às vigas 7SRFLV e 7SRFLI (vigas iguais à viga REF-7SR reforçadas ao corte com laminados de CFRP). Verifica-se que, relativamente à viga de referência REF-7SR, as vigas em análise reforçadas ao corte com CFRP obtiveram melhor desempenho. Considerando a força máxima registada na viga REF-7SR, verifica-se que a viga 7SRFLV (laminados verticais) obteve um valor 28% superior enquanto a viga 7SRFLI (laminados inclinados a 45°) teve um valor 21% (no mínimo) superior. Em termos de flecha na rotura, a viga 7SRFLV teve melhor desempenho que a viga REF-7SR, o que não aconteceu com a viga 7SRFLI devido à rotura localizada do suporte mais solicitado da viga, anteriormente referido. Ambas as soluções de reforço de CFRP conduziram à cedência das armaduras

longitudinais. O reforço com laminados na vertical modificou o modo de rotura da viga de referência REF-7SR (deixou de ser por corte e passou a ser por flexão). Na Figura 17 apresenta-se o aspecto final das vigas REF-7SR, 7SRFLI e 7SRFLV após a realização dos ensaios, onde é possível verificar que as vigas reforçadas ao corte com CFRP têm um padrão final de fendilhação mais extenso que o verificado na viga REF-7SR.

4.3 Análise do rendimento do reforço ao corte com CFRP

O valor do esforço transversal resistente de cada uma das vigas ensaiadas é de:

$$V_r = 0.6F_{\max}, \quad (\text{Equação 1})$$

em que F_{\max} é o valor da força máxima registada em cada viga (Tabela 3).

Adoptando, para o caso das vigas de betão armado reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento, o mesmo princípio que é utilizado nos códigos de dimensionamento para quantificação da parcela resistente ao esforço transversal de uma viga de betão armado, tem-se:

$$V_r = V_c + V_s + V_f, \quad (\text{Equação 2})$$

ou seja, à contribuição do betão (V_c) e à dos estribos de aço (V_s) é adicionada a contribuição do reforço ao corte com CFRP (V_f).

Na Tabela 4 apresentam-se, para as vigas ensaiadas, o valor de V_r e das respectivas componentes presentes na equação (2). Na mesma tabela é apresentado o rendimento do reforço ao corte com CFRP em termos da capacidade resistente ao esforço transversal. A análise dos dados da Tabela 4 permite constatar que o reforço ao corte com laminados de CFRP proporcionou aumentos da capacidade resistente ao esforço transversal entre os 8% e os 146%. Os maiores incrementos (>90%) foram registados nas vigas reforçadas ao corte apenas com CFRP (sem estribos). A solução que conduziu ao menor aumento da capacidade resistente ao corte foi a da viga 5SRFLV (8%), enquanto nas restantes vigas com reforço de CFRP contendo estribos o referido aumento foi de: 28%, 21% (no mínimo) e 25% (no mínimo) nas vigas 7SRFLV, 7SRFLI e 5SRFLI, respectivamente. De um modo geral, a solução de laminados inclinados foi mais eficaz que a de laminados verticais.

Tabela 4 – Rendimento do reforço.

Vigas	Reforço ao corte	V_r (kN)	V_c^* (kN)	V_s (kN)	V_f (kN)	Rendimento do CFRP (%)
REF-C	-	106.6	106.6	-	-	-
REF-S	Estribos de aço (100%)	>271.0	106.6	>164.4	-	-
REF-7S	Estribos de aço (70%)	257.8	106.6	151.2	-	-
REF-5S	Estribos de aço (50%)	259.3	106.6	152.7	-	-
REF-SR	Estribos de aço (100%)	292.9	106.6	186.3	-	-
REF-7SR	Estribos de aço (70%)	235.6	106.6	129.0	-	-
REF-5SR	Estribos de aço (50%)	242.5	106.6	135.9	-	-
CRFLV1	Laminados de CFRP	203.0	106.6	-	96.4	90
CRFLV2	Laminados de CFRP	207.5	106.6	-	100.9	95
CRFLI1	Laminados de CFRP	253.9	106.6	-	147.3	138
CRFLI2	Laminados de CFRP	249.8	106.6	-	143.2	134
CRFLI3	Laminados de CFRP	262.0	106.6	-	155.4	146
7SRFLV	Estribos de aço (70%) + Laminados de CFRP	302.3	106.6	129.0**	66.7	28
7SRFLI	Estribos de aço (70%) + Laminados de CFRP	>285.4	106.6	129.0**	>49.8	>21
5SRFLV	Estribos de aço (50%) + Laminados de CFRP	262.7	106.6	135.9***	20.2	8
5SRFLI	Estribos de aço (50%) + Laminados de CFRP	>302.7	106.6	135.9***	>60.2	>25

* Em todas as vigas foi considerado o valor obtido na viga REF-C; ** Valor obtido na viga REF-7SR; *** Valor obtido na viga REF-5SR.

5 Conclusões

Os resultados do programa experimental descrito neste trabalho conduziram às seguintes conclusões:

- a aplicação da técnica NSM no reforço ao corte de vigas T é viável, quer para vigas sem qualquer armadura transversal, quer para vigas com a presença de estribos de aço;
- tendo por base os resultados obtidos na viga de referência sem qualquer armadura de esforço transversal (REF-C), verificou-se que os modelos reforçados ao corte unicamente com CFRP apresentaram um aumento médio da carga máxima de 93% para a solução de laminados verticais e 140% para a solução de laminados inclinados a 45°. Tomando em consideração a carga máxima da viga de betão armado REF-SR, que contém a quantidade máxima de estribos considerada, os modelos reforçados ao corte unicamente com CFRP apresentaram uma carga máxima de 70% para a solução de laminados verticais e 87% para a solução de laminados inclinados a 45°;
- tendo por base a capacidade de carga registada na viga com 50% da quantidade máxima de estribos considerada (REF-5SR), verificou-se que o reforço de CFRP aplicado a este tipo de modelo proporcionou um aumento de capacidade de carga de 8% para a solução de laminados verticais e 25% (no mínimo) para a solução de laminados inclinados a 45°. A solução de reforço com CFRP na vertical teve uma carga máxima de 90% da atingida pela viga REF-SR enquanto a solução de reforço com laminados inclinados a 45° superou a carga máxima da viga REF-SR (>1.03 vezes);
- tendo por base a capacidade de carga registada na viga com 70% da quantidade máxima de estribos considerada (REF-7SR), verificou-se que o reforço de CFRP aplicado a este tipo de modelo proporcionou um aumento da capacidade de carga de 28% para a solução de laminados verticais e 21% (no mínimo) para a solução de laminados inclinados a 45°. A solução de reforço com CFRP na vertical teve uma carga máxima de 1.03 vezes superior à da atingida pela viga REF-SR. A solução de reforço com laminados inclinados a 45° teve um valor registado de carga máxima igual a 97% da verificada na viga REF-SR, mas caso não tivesse ocorrido a rotura localizada do suporte mais solicitado da viga este valor seria superado;
- em termos de carga de serviço, as vigas reforçadas ao corte unicamente com laminados de CFRP inclinados a 45° foram as que apresentaram maior capacidade de carga;
- de entre as vigas reforçadas ao corte com CFRP as que tinham estribos de aço tiveram melhor comportamento em termos de carga máxima e respectiva flecha na secção de aplicação da carga;
- o reforço ao corte com CFRP proporcionou em algumas das soluções testadas a cedência das armaduras longitudinais;
- em termos de orientação do reforço ao corte com CFRP, a solução com laminados inclinados a 45° foi mais eficaz que a solução com laminados verticais;
- nas vigas reforçadas ao esforço transversal com laminados de CFRP com rotura por corte, após a formação da fenda de corte no interior da viga, o betão de recobrimento das faces laterais, que se encontra reforçado com os laminados, forma uma estrutura laminar, tipo parede, que se destaca do núcleo da alma da viga, tendo como consequência um sub-aproveitamento do potencial de reforço dos laminados. No entanto, este sistema de reforço permitiu níveis elevados de incremento de capacidade de carga de vigas com rotura por corte;
- as diferenças existentes no número de estribos de aço das vigas REF-SR, REF-5SR e REF-7SR não se manifestaram de forma proporcional em termos de carga máxima das vigas. Com efeito, o número de estribos efectivos que atravessam a fenda de rotura por corte não foi proporcional à quantidade total de estribos que as vigas continham. Este facto justifica os valores da carga máxima das vigas REF-SR, REF-5SR e REF-7SR;
- verificou-se que numa solução de reforço simultâneo à flexão e ao corte com CFRP é necessário ter conta as interacções existentes, nomeadamente, a influência no comportamento do elemento reforçado da zona de interrupção do reforço longitudinal de CFRP. A necessidade de reforçar as vigas à flexão no sentido de evitar a rotura por flexão, permitiu verificar que o reforço à flexão com a técnica NSM proporcionou

aumentos da capacidade de carga superiores a 12% em vigas com elevada percentagem de armadura longitudinal.

6 Agradecimentos

Os autores do presente trabalho expressam o seu agradecimento às empresas Empreiteiros Casais, Degussa Construction Chemicals Portugal, S&P Reinforcement, Unibetão (Braga) e CEMACON (INEGI). Os autores manifestam também os seus agradecimentos ao apoio prestado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no projecto POCTI/ECM/59033/2004.

7 Referências

BARROS, J.; FERREIRA D.; FORTES A.; DIAS, S. **Assessing the effectiveness of embedding CFRP laminates in the near surface for structural strengthening**. Artigo aceite para publicação no Journal Construction and Building Materials, 2005.

BOUSSELHAM A.; CHAALLAL, O.. **Shear Strengthening Reinforced Concrete Beams with Fiber-Reinforced Polymer: Assessment of Influencing Parameters and Required Research**. ACI Structural Journal, Vol.101, Nº2, March-April, pp.219-227, 2004.

BLASCHKO, M.; ZILCH, K.. **Rehabilitation of concrete structures with CFRP strips glued into slits**. Proceedings of the Twelfth International Conference of Composite Materials, ICCM 12, Paris, France (CD-ROM), 1999.

DE LORENZIS, L.. **Strengthening of RC Structures with Near-Surface Mounted FRP rods**. PhD Thesis, Università Degli Studi di Lecce, Italy, May, 289 pp, 2002.

DEGUSSA CONSTRUCTION CHEMICALS PORTUGAL. **Fichas técnicas MBrace Resin 50, MBrace Resin 55 e MBrace Resin 220**. Maio, 2003.

DIAS, S.; BARROS, J.. **Materiais compósitos de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado**. Relatório Técnico 04-DEC/E-03, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Fevereiro, 74 pp, 2004-a.

DIAS, S.; BARROS, J.. **CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado: investigação experimental e modelos analíticos**. Relatório Técnico 04-DEC/E-08, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Maio, 109 pp, 2004-b.

EL-HACHA, R.; RISKALLA S.H.. **Near-Surface-Mounted Fiber-Reinforced Polymer Reinforcements for Flexural Strengthening of Concrete Structures**. ACI Structural Journal, Vol.101, Nº5, September-October, pp.717-726, 2004.

KHALIFA, A. **Shear Performance of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Advanced Composites**. PhD. Thesis, Structural Engineering Department, Alexandria University, Egypt, 1999.

SENA-CRUZ, J. M.. **Strengthening of concrete structures with near-surface mounted CFRP laminate strips**. PhD Thesis, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, 213 pp, 2004.

S&P REINFORCEMENT. **Design guide line for S&P FRP systems**. S&P Clever Reinforcement Company, Switzerland, 69 pp, 2002.